Teoría del Residuo Termodinámico Viscoso (TRT-VC)

Dr. Carlos David Bianco Moreno

C.I.: 17.570.016

Venezuela 20/12/2025

carlosdavid1985@hotmail.es

Introducción

La Teoría del Residuo Termodinámico Viscoso (TRT-VC) propone que la aceleración cósmica se debe, no a una constante cosmológica fundamental, sino al residuo energético generado por la disipación macroscópica del fluido cósmico a gran escala. Esa disipación se modela mediante una viscosidad de volumen (bulk viscosity) ζque produce una presión efectiva negativa y una transferencia neta de energía desde el fluido material hacia un componente de "energía oscura efectiva". Aquí presento la teoría de forma didáctica y completa: hipótesis físicas, formalismo matemático (fondo y perturbaciones), condiciones de estabilidad, esquema numérico para integración y ajuste, y predicciones observacionales.

1. Resumen físico de la TRT-VC

- **Idea central:** el universo a gran escala se comporta como un fluido con **viscosidad de volumen** (bulk viscosity) ζ. La presión efectiva incluye un término viscoso $p_{\text{visc}} = -3\zeta H$. Esa disipación convierte energía cinética de la expansión en una contribución de "residuo" que actúa como energía oscura dinámica.
- **Motivación:** ofrecer una explicación macroscópica y parsimoniosa de la energía oscura sin introducir campos nuevos; la viscosidad puede depender de la densidad de materia ρ_m(p. ej. $\zeta(\rho_m) = \zeta_0\, \rho_m^n$) y así producir una historia de $H(z)$que reproduce la transición a aceleración y ofrece predicciones falsables.
- **Ventaja:** formulación directa sobre las ecuaciones de Friedmann y continuidad; falsable con CMB, BAO, SNIa y crecimiento de estructuras.
- **Desafío:** justificar microfísicamente la existencia y magnitud de ζ; comprobar estabilidad (no generar modos no físicos) y compatibilidad con pruebas locales.

Idea física y supuestos básicos

- **Fluido cósmico efectivo: el contenido material del universo (materia bariónica + materia oscura + radiación) se describe como un fluido relativista con una presión efectiva que incluye un término viscoso isotrópico de volumen.**
- **Viscosidad de volumen: la presión viscosa isotrópica se escribe**

$$\boldsymbol{p_{\text{visc}} = -3\,\zeta(H, \rho_m)\,H,}$$

donde $\zeta \geq 0$es el coeficiente de viscosidad de volumen (posible función de la densidad de materia ρ_my/o de H). El signo negativo indica disipación que actúa como freno a la expansión y puede generar presión efectiva negativa.

- **Residuo energético: la disipación se interpreta como una transferencia de energía por unidad de volumen Qdesde el fluido material hacia un componente ρ_{DE}que actúa como energía oscura efectiva.**
- **Conservación total: la energía-momento total se conserva; la viscosidad solo redistribuye energía entre componentes, por lo que las ecuaciones de continuidad se modifican por Qpero la suma total se conserva.**

Formalismo matemático

1. Ecuaciones de fondo

Partimos de un universo FLRW plano con escala $a(t)$y Hubble $H = \dot{a}/a$. Las ecuaciones de Friedmann son las usuales:

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\,\rho_{\mathrm{tot}}, \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho_{\mathrm{tot}} + \frac{3p_{\mathrm{tot}}}{c^2}\right),$$

donde $\rho_{\mathrm{tot}} = \rho_m + \rho_r + \rho_{\mathrm{DE}}$y $p_{\mathrm{tot}} = p_m + p_r + p_{\mathrm{visc}} + p_{\mathrm{DE}}$. Tomamos $p_m \simeq 0, p_r = \rho_r c^2/3$y $p_{\mathrm{DE}} \approx w_{\mathrm{DE}}\rho_{\mathrm{DE}}c^2$(en la práctica $w_{\mathrm{DE}} \approx -1$).

Definición del término de transferencia La disipación por viscosidad produce una tasa de conversión de energía por unidad de volumen:

$$Q \equiv -\nabla_\mu T^{\mu 0}_{\mathrm{mat}}(\textbf{en el frame comóvil}),$$

y, a partir de $p_{\mathrm{visc}} = -3\zeta H$, una forma natural es

$$Q = 9\,\zeta(H, \rho_m)\,H^2.$$

Esta expresión se obtiene considerando la potencia disipada por unidad de volumen $\sim p_{\mathrm{visc}}\,3H$y reescalando factores numéricos; es una parametrización física y sencilla que conecta ζcon la tasa de transferencia.

Ecuaciones de continuidad con transferencia Separando materia y residuo:

$$\dot{\rho}_m + 3H\rho_m = -Q,$$

$$\dot{\rho}_r + 4H\rho_r = 0,$$

$$\dot{\rho}_{\mathrm{DE}} + 3H(1 + w_{\mathrm{DE}})\rho_{\mathrm{DE}} = +Q.$$

La suma de las tres conserva la energía total.

2. Parametrización de la viscosidad

Para explorar modelos consideramos la familia

$$\zeta(H, \rho_m) = \zeta_0 \left(\frac{\rho_m}{\rho_{m,0}}\right)^{\alpha},$$

con $\zeta_0$dimensional y αreal. Es útil definir la versión adimensional

$$\tilde{\zeta}_0 \equiv \frac{\zeta_0 H_0}{\rho_{c,0}},$$

donde $\rho_{c,0} = 3H_0^2/(8\pi G)$. Trabajaremos con variables adimensionales $\Omega_i = \rho_i/\rho_{c,0}$y $E \equiv H/H_0$para evitar problemas numéricos.

3. Ecuaciones en variables adimensionales y en $N = \ln\ a$

Definir $N = \ln\ a$y derivar respecto a N(notación $' \equiv d/dN$). Usando $\dot{\rho} = H\rho'$y Qadimensionalizado $Q_{\mathrm{dimless}} = Q/(\rho_{c,0} H_0)$, las ecuaciones se escriben:

$$\Omega_m' = -3\Omega_m - \frac{Q_{\mathrm{dimless}}}{E},$$

$$\Omega_r' = -4\Omega_r,$$

$$\Omega_{\mathrm{DE}}' = -3(1 + w_{\mathrm{DE}})\Omega_{\mathrm{DE}} + \frac{Q_{\mathrm{dimless}}}{E},$$

con

$$E^2 = \Omega_m + \Omega_r + \Omega_{\mathrm{DE}},$$

y

$$Q_{\mathrm{dimless}} = 9\, \tilde{\zeta}_0\, \Omega_m^{\alpha}\, E^2.$$

Este sistema es el que se integra numéricamente.

Perturbaciones lineales

1. Variables y gauge

Trabajamos en gauge Newtoniano con potenciales métricos Ψy Φ. Las variables de materia son la contraste de densidad δ_my la divergencia de velocidad θ_m. Para el residuo usamos $\delta_{\rm DE}$(si se modela dinámicamente) o tratamos $\rho_{\rm DE}$como fondo con pequeñas perturbaciones inducidas por Q.

2. Ecuaciones de continuidad y Euler con Q

La presencia de Qmodifica las ecuaciones de conservación de cada componente. Para materia no relativista:

$$\dot{\delta}_m + \frac{\theta_m}{a} - 3\dot{\Phi} = -\frac{Q}{\rho_m}\delta_m - \frac{\delta Q}{\rho_m},$$

$$\dot{\theta}_m + H\theta_m - \frac{k^2}{a}\Psi = -\frac{Q}{\rho_m}\theta_m.$$

Aquí δQes la perturbación del término de transferencia. Para el residuo:

$$\dot{\delta}_{\rm DE} + 3H(c_{s,\rm DE}^2 - w_{\rm DE})\delta_{\rm DE} + (1 + w_{\rm DE})\left(\frac{\theta_{\rm DE}}{a} - 3\dot{\Phi}\right) = \frac{\delta Q}{\rho_{\rm DE}} - \frac{Q}{\rho_{\rm DE}}\delta_{\rm DE}.$$

3. Expresión para δQ

Si $\zeta = \zeta(\rho_m)$, linealizando:

$$\delta Q = 9\left[\zeta'(\rho_m)\,\delta\rho_m\,H^2 + 2\zeta(\rho_m)\,H\,\delta H\right],$$

y con $\delta\rho_m = \rho_m\delta_m$y δHrelacionado con $\delta\rho_{\rm tot}$por la ecuación de Poisson en el límite subhorizonte. En variables adimensionales:

$$\delta Q_{\rm dimless} = 9\,\tilde{\zeta}_0\left[\alpha\,\Omega_m^{\alpha-1}\,\Omega_m\,\delta_m\,E^2 + 2\Omega_m^{\alpha}\,E\,\delta E\right].$$

Esta expresión se inserta en las ecuaciones de continuidad y Euler para cerrar el sistema.

4. Condiciones de estabilidad lineal

- **No-ghost: coeficientes cinéticos positivos en la acción efectiva de perturbaciones; en práctica, evitar signos negativos en términos cinéticos de $\delta_{\rm DE}$.**
- **No tachyón: masa efectiva positiva $m_{\rm eff}^2 \geq 0$para las perturbaciones del residuo.**
- **Velocidad de sonido física: $c_s^2 \geq 0$y no superluminal. Para el residuo, $c_{s,\rm DE}^2$puede derivarse del modelo microfísico o parametrizarse; si el residuo es esencialmente vacío efectivo, $c_{s,\rm DE}^2 \approx 1$y las perturbaciones se suprimen en subhorizonte.**

Implementación numérica y ajuste de parámetros

1. Variables y escalado

- Integrar el sistema en $N = \ln\ a$usando variables adimensionales Ω_iy E.
- Evitar overflow usando logaritmos para condiciones iniciales en z_{ini}grandes.

2. Esquema de integración

- Integrador: solver stiff (BDF/LSODA) para el fondo; RK45 o método implícito para perturbaciones según rigidez.
- Paso adaptativo: controlar tolerancias relativas 10^{-8}–10^{-10} y absolutas 10^{-10}–10^{-12}.
- Condiciones iniciales: en z_{ini}profundo (radiation era) tomar $\Omega_{\text{DE}} \ll 1$, Ω_my $\Omega_r$según ΛCDM escaladas; para perturbaciones usar condiciones adiabáticas estándar (p. ej. $\delta_m \sim \delta_r$en superhorizonte).

3. Parámetros a muestrear y priors recomendados

- Parámetros principales: $\tilde{\zeta}_0$(log-uniforme), α(uniforme en $[-1,1]$), w_{DE}(si se deja libre), $\Omega_{m,0}$, H_0.
- Priors sugeridos: $\log_{10}\tilde{\zeta}_0 \in [-12,-2]$(exploratorio), $\alpha \in [-1,1]$.
- Sampler: Cobaya/MontePython o emcee; usar likelihoods Planck-like (comprimidos), BAO, Pantheon y $f\sigma_8$.

4. Tests numéricos y criterios de convergencia

- Conservación total: comprobar que $\Omega_m + \Omega_r + \Omega_{\text{DE}} \approx E^2$numéricamente.
- Convergencia MCMC: $\hat{R} < 1.02$.
- Estabilidad de perturbaciones: integrar para varios ky verificar ausencia de divergencias.

Predicciones observacionales y pruebas

- Expansión: $H(z)$se modifica sutilmente; para $\tilde{\zeta}_0$pequeño las desviaciones respecto a ΛCDM son $\lesssim$1% en $0 < z < 2$.
- Ecuación de estado efectiva: definir

$$w_{\text{eff}}(z) \equiv -1 + \frac{1}{3}\frac{d\ln\ \rho_{\text{DE}}}{d\ln\ a},$$

que para TRT-VC suele dar $w_{\text{eff}} \gtrsim -1$(ligeramente menos negativo) y una evolución característica que puede distinguirse con Euclid/Roman.

- **Crecimiento de estructuras: $f\sigma_8(z)$se suprime levemente por la pérdida de energía de la materia; esto puede aliviar parcialmente la tensión S_8.**
- **ISW y CMB: cambios en la historia de $H(z)$y en las potenciales métricas afectan el efecto ISW; la compatibilidad con Planck impone límites fuertes sobre $\tilde{\zeta}_0$.**
- **Pruebas locales: la TRT-VC no introduce fuerzas de quinta, pero la microfísica que origine ζdebe respetar límites locales (p. ej. no generar fricciones detectables en escalas de laboratorio).**

Interpretación microfísica y vías de justificación

- **Teoría cinética: en un gas con interacciones, la viscosidad de volumen puede calcularse desde la ecuación de Boltzmann; ζdepende de secciones eficaces y tiempos de relajación y puede escalar con la densidad y la temperatura.**
- **Sector oscuro disipativo: si existe un sector oscuro con procesos irreversibles (decays, scattering inelástico), su acoplamiento gravitacional puede manifestarse como una viscosidad efectiva en la ecuación de fluidos del universo.**
- **Derivación efectiva: integrar grados de libertad rápidos en una acción efectiva produce términos no-adiabáticos que se interpretan como viscosidad y generan Q.**

Conclusión y hoja de ruta práctica

- **TRT-VC es un marco físico y matemático coherente para modelar la energía oscura como un residuo de disipación viscosa.**
- **Pasos inmediatos recomendados:**
    1. **integrar el sistema adimensional en $N = \ln\ a$con tolerancias estrictas;**
    2. **implementar las ecuaciones de perturbación completas (sin aproximaciones para δH);**
    3. **ejecutar MCMC con likelihoods oficiales para acotar $\tilde{\zeta}_0$y α;**
    4. **explorar derivaciones microfísicas concretas (Boltzmann, sector oscuro) para justificar la magnitud de ζ.**
- **Observacionalmente la teoría es falsable: misiones próximas pueden mejorar límites y detectar la firma característica en $w_{\text{eff}}(z)$y en $f\sigma_8(z)$.**

Ecuaciones de perturbación completas para TRT-VC

A continuación tienes la derivación completa para implementar numéricamente las ecuaciones de perturbación lineal de la TRT-VC en gauge Newtoniano. Incluyo las expresiones explícitas para δQ, condiciones iniciales físicas, esquema de integración recomendado, comprobaciones de estabilidad y pseudocódigo listo para codificar.

1 Notación y supuestos básicos

- **Métrica en gauge Newtoniano (sin anisotropía de shear adicional):**

$$ds^2 = -(1+2\Psi)dt^2 + a^2(t)(1-2\Phi)\delta_{ij}dx^i dx^j.$$

- **Variables de fondo (adimensionales):** $\Omega_i = \rho_i/\rho_{c,0}$, $E \equiv H/H_0$, $N = \ln\, a$.
- **Componentes: materia no relativista (m), radiación (r), residuo/energía oscura efectiva (DE) generado por viscosidad.**
- **Presión viscosa de fondo:**

$$p_{\text{visc}} = -3\zeta(H,\rho_m)\, H.$$

- **Término de transferencia de fondo (adimensional):**

$$Q_{\text{dimless}} \equiv \frac{Q}{\rho_{c,0}H_0} = 9\,\tilde{\zeta}_0\,\Omega_m^{\alpha}\,E^2,$$

con $\tilde{\zeta}_0 = \zeta_0 H_0/\rho_{c,0}$.

2 Ecuaciones de perturbación en Fourier (gauge Newtoniano)

Trabajamos en espacio de Fourier con modo k. Derivadas temporales con respecto a $t$se convierten a derivadas respecto a Nmediante $\dot{X} = HX'$(prima $\;' \equiv d/dN$).

2.1 Ecuaciones de Einstein linealizadas (componentes relevantes)

- **Ecuación 00(Poisson generalizada):**

$$-2\frac{k^2}{a^2}\Phi + 6H(\dot{\Phi} + H\Psi) = 8\pi G\,\delta\rho_{\text{tot}}.$$

En variables adimensionales y usando Ey $\rho_{c,0}$:

$$-2\frac{k^2}{a^2H_0^2}\Phi + 6E(E\Phi' + E\Psi) = 3E^2\,\delta_{\text{tot}},$$

donde $\delta_{\text{tot}} \equiv \sum_i \Omega_i\,\delta_i/E^2$.

- **Ecuación $0i$(momentum constraint):**

$$2(\dot{\Phi} + H\Psi) = 8\pi G\,(\rho_{\text{tot}} + p_{\text{tot}}/c^2)\frac{\theta_{\text{tot}}}{k^2/a},$$

en práctica se usa para relacionar θy potenciales.

- **Ecuación ij(traza y anisótropía): si no hay anisotropía adicional, $\Phi = \Psi$salvo contribuciones de shear; asumimos $\Phi = \Psi$para el esquema básico (si se incluye shear, añadir término σ).**

2.2 Materia (no relativista) — continuidad y Euler

Continuidad (en tiempo cósmico):

$$\dot{\delta}_m + \frac{\theta_m}{a} - 3\dot{\Phi} = -\frac{Q}{\rho_m}\delta_m - \frac{\delta Q}{\rho_m}.$$

En N:

$$\delta_m' + \frac{\theta_m}{aH} - 3\Phi' = -\frac{Q_{\text{dimless}}}{E\,\Omega_m}\,\delta_m - \frac{\delta Q_{\text{dimless}}}{E\,\Omega_m}.$$

Euler:

$$\dot{\theta}_m + H\theta_m - \frac{k^2}{a}\Psi = -\frac{Q}{\rho_m}\theta_m.$$

En N:

$$\theta_m' + \left(1 + \frac{Q_{\text{dimless}}}{E\,\Omega_m}\right)\theta_m - \frac{k^2}{aH}\Psi = 0.$$

2.3 Radiación

Para radiación usar las ecuaciones estándar (Boltzmann hierarchy) o, en aproximación fluida:

$$\delta_r' + \frac{4}{3}\frac{\theta_r}{aH} - 4\Phi' = 0, \theta_r' + \frac{1}{4}\frac{k^2}{aH}\delta_r = 0,$$

sin acoplamiento directo a Q(salvo modelado específico).

2.4 Residuo / DE efectivo — continuidad y Euler (si se trata dinámicamente)

Continuidad:

$$\delta_{\text{DE}}' + 3(c_{s,\text{DE}}^2 - w_{\text{DE}})\delta_{\text{DE}} + (1 + w_{\text{DE}})\left(\frac{\theta_{\text{DE}}}{aH} - 3\Phi'\right) = \frac{\delta Q_{\text{dimless}}}{E\,\Omega_{\text{DE}}} - \frac{Q_{\text{dimless}}}{E\,\Omega_{\text{DE}}}\delta_{\text{DE}}.$$

Euler (si se modela velocidad):

$$\theta_{\text{DE}}' + \left[1 - 3c_{s,\text{DE}}^2\right]\theta_{\text{DE}} - \frac{k^2}{aH}\frac{c_{s,\text{DE}}^2}{1 + w_{\text{DE}}}\delta_{\text{DE}} - \frac{k^2}{aH}\Psi = -\frac{Q_{\text{dimless}}}{E\,\Omega_{\text{DE}}}\theta_{\text{DE}}.$$

En la práctica, si Ω_{DE}actúa casi como vacío, puedes fijar $w_{\text{DE}} = -1$y suprimir θ_{DE}y δ_{DE}salvo la fuente por δQ; pero para consistencia completa conviene integrar δ_{DE}con $c_{s,\text{DE}}^2$parametrizado.

3 Expresión explícita de δQ

Si $\zeta = \zeta(\rho_m)$con $\zeta = \zeta_0(\rho_m/\rho_{m,0})^\alpha$, linealizando:

- **En unidades adimensionales:**

$$Q_{\mathrm{dimless}} = 9\,\tilde{\zeta}_0\,\Omega_m^\alpha\,E^2.$$

- **Derivada de ζrespecto a ρ_m(adimensional):**

$$\frac{d\ln\,\zeta}{d\ln\,\rho_m} = \alpha.$$

- **Perturbación $\delta Q_{\mathrm{dimless}}$:**

$$\delta Q_{\mathrm{dimless}} = 9\tilde{\zeta}_0\left[\alpha\,\Omega_m^{\alpha-1}\,\Omega_m\,\delta_m\,E^2 + 2\Omega_m^\alpha\,E\,\delta E\right].$$

donde δEse relaciona con $\delta\rho_{\mathrm{tot}}$por

$$2E\,\delta E = \delta(\Omega_m + \Omega_r + \Omega_{\mathrm{DE}}) = \Omega_m\delta_m + \Omega_r\delta_r + \Omega_{\mathrm{DE}}\delta_{\mathrm{DE}}.$$

Por tanto

$$\delta E = \frac{1}{2E}(\Omega_m\delta_m + \Omega_r\delta_r + \Omega_{\mathrm{DE}}\delta_{\mathrm{DE}}).$$

Sustituyendo:

$$\delta Q_{\mathrm{dimless}} = 9\tilde{\zeta}_0\left[\alpha\,\Omega_m^\alpha\,E^2\,\delta_m + \Omega_m^\alpha\,E\,\frac{\Omega_m\delta_m + \Omega_r\delta_r + \Omega_{\mathrm{DE}}\delta_{\mathrm{DE}}}{E}\right].$$

Simplificando:

$$\boxed{\delta Q_{\mathrm{dimless}} = 9\tilde{\zeta}_0\,\Omega_m^\alpha\left[\alpha E^2\delta_m + \Omega_m\delta_m + \Omega_r\delta_r + \Omega_{\mathrm{DE}}\delta_{\mathrm{DE}}\right].}$$

Esta es la forma que debes usar en las ecuaciones de continuidad y Euler (dividir por Ey por $\Omega_i$según corresponda).

4 Condiciones iniciales y régimen superhorizonte

- **Época inicial: elegir z_{ini}en era radiación o justo antes de recombinación (ej. $z_{\mathrm{ini}} \sim 10^4$–$10^6$) según estabilidad numérica.**
- **Condiciones adiabáticas superhorizonte:**

$$\delta_r = \frac{4}{3}\delta_m, \delta_{\mathrm{DE}} \approx 0\ (\text{o pequeña}), \theta_i \approx -\frac{k^2}{2}\eta\,\delta_i$$

En práctica, para integración en Npuedes usar:

$$\delta_m(N_{\mathrm{ini}}) = A(k), \delta_r(N_{\mathrm{ini}}) = \frac{4}{3}A(k), \theta_m(N_{\mathrm{ini}}) = \theta_r(N_{\mathrm{ini}}) = 0,$$

con $A(k)$pequeño (p. ej. 10^{-5}). Para modos subhorizonte iniciales ajustar condiciones de acuerdo a la solución asintótica.

5 Esquema numérico recomendado

1. **Integrar fondo en N(ya implementado): obtener $\Omega_i(N)$, $E(N)$, $Q_{\mathrm{dimless}}(N)$.**
2. **Interpoladores: construir interpoladores suaves (cúbicos) para $\Omega_i(N)$, $E(N)$, $Q_{\mathrm{dimless}}(N)$y sus derivadas si se necesitan.**
3. **Sistema de ODEs para perturbaciones: para cada $k$integrar el vector**

$$\mathrm{y} = \{\delta_m, \theta_m, \delta_r, \theta_r, \delta_{\mathrm{DE}}, \theta_{\mathrm{DE}}, \Phi\}$$

usando las ecuaciones dadas y la relación de Poisson para Φ:

$$\Phi = -\frac{3}{2}\frac{E^2}{k^2/(aH_0)^2}\sum_i \Omega_i\,\delta_i.$$

(Usar la forma adimensional adecuada: $k/(aH_0)$aparece en denominador.)

4. **Integrador: usar solve_ivp con método RK45 o Radau/BDF si el sistema es rígido; tolerancias rtol=1e-8, atol=1e-10.**
5. **Orden de integración: integrar desde N_{ini}hasta $N = 0$(hoy) para cada $k$de interés.**
6. **Cálculo de observables: factor de crecimiento $D(z)$, $f(z) = d\ln\ D/d\ln\ a$, $f\sigma_8(z) = f(z)\sigma_8(z)$(calcular $\sigma_8(z) = \sigma_{8,0}D(z)$con normalización).**
7. **Comprobaciones:**
   - **conservación total: $\sum_i \Omega_i' - 2EE' \approx 0$numéricamente.**
   - **ausencia de NaN/inf.**
   - **comprobar que no aparecen modos crecientes no físicos en δpara $k \to 0$.**